

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRENDA DAYANNE DA SILVA GUEDES**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM GRUPO GERADOR ELÉTRICO  
COM MOTOR DO CICLO OTTO FUNCIONANDO NA FORMA DUAL  
(GASOLINA/HIDROGÊNIO) EM RELAÇÃO À SUA CONFIGURAÇÃO  
ORIGINAL**

**JOÃO PESSOA**

**2018**

**BRENDA DAYANNE DA SILVA GUEDES**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM GRUPO GERADOR ELÉTRICO  
COM MOTOR DO CICLO OTTO FUNCIONANDO NA FORMA DUAL  
(GASOLINA/HIDROGÊNIO) EM RELAÇÃO À SUA CONFIGURAÇÃO  
ORIGINAL**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado  
na Universidade Federal da Paraíba como requisito  
parcial para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Dr. Adriano Sitônio Rumão

JOÃO PESSOA

2018

**Catálogo na publicação Seção de  
Catálogo e Classificação**

G924a Guedes, Brenda Dayanne da Silva.

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM GRUPO GERADOR ELÉTRICO COM  
MOTOR DO CICLO OTTO FUNCIONANDO NA FORMA DUAL  
(GASOLINA/HIDROGÊNIO) EM RELAÇÃO À SUA CONFIGURAÇÃO  
ORIGINAL / Brenda Dayanne da Silva Guedes. - João  
Pessoa, 2018.

33 f. : il.

Orientação: Adriano Rumão.  
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Hidrogênio. Eletrólise. Motor Otto. Gasolina. I.  
Rumão, Adriano. II. Título.

UFPB/BC

# **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM GRUPO GERADOR ELÉTRICO COM MOTOR DO CICLO OTTO FUNCIONANDO NA FORMA DUAL (GASOLINA/HIDROGÊNIO) EM RELAÇÃO À SUA CONFIGURAÇÃO ORIGINAL**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido  
ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal da Paraíba como parte das exigências do  
Programa de Graduação em Engenharia Mecânica  
para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Aprovado em...../...../.....

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Adriano Sitônio Rumão  
Orientador

---

Prof. Dr. Benilton Luis Nascimento de Oliveira  
Examinador

---

Prof. Dr. Bruno Leonardo Campelo de Queiroga  
Examinador

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, que sempre me deu força para superar as dificuldades, Ele que é verdadeiro mestre, fonte de sabedoria infinita.

A Santa Maria, doce mãe, por todo o consolo e por sempre ter sido em minha vida um exemplo de humildade e confiança no Senhor.

Aos meus pais, Francisco e Eva, e às minhas irmãs, minhas *Bês*, por todo amor, apoio e incentivo que me deram desde sempre.

Ao meu orientador, o professor Adriano Rumão, pela paciência, suporte e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do laboratório de Inovação por toda ajuda que me foi dada.

Aos meus amigos, pela confiança, incentivo e *carões* necessários (sim, *batcaverna*, agradeço até pelos *carões*).

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, o meu muito obrigada.

## RESUMO

Este trabalho traz um estudo sobre o uso do hidrogênio em motores de combustão interna do ciclo Otto. O interesse em estudar combustíveis alternativos, entre eles o hidrogênio, surgiu da crescente preocupação mundial com os problemas ambientais que são causados pelos combustíveis fósseis, bem como seu possível aumento de custo no futuro devido à sua escassez, uma vez que estas são fontes não renováveis. Para este estudo foram feitos experimentos utilizando protótipos para analisar a eficiência de um motor que utilizava apenas a gasolina como combustível comparado ao motor que tinha o hidrogênio, produzido através da eletrólise, adicionado à gasolina. Os dados obtidos foram exibidos em gráficos comparativos que mostraram que houve uma redução do consumo de gasolina e um aumento na eficiência no caso em que o hidrogênio foi usado como combustível auxiliar. A implantação dessa tecnologia tem encontrado alguns obstáculos, como alto custo e periculosidade, mas que vem sendo solucionados à medida que as pesquisas em torno do assunto têm avançado. Considerando que o hidrogênio é um combustível abundante, limpo e com um grande potencial energético, ele pode futuramente ser usado como fonte de energia não só para motores veiculares, mas também para outras diversas aplicações. Por isso que o hidrogênio tem sido chamado por muitos estudiosos como o combustível do futuro.

**Palavras-chave:** Hidrogênio. Eletrólise. Motor Otto. Gasolina.

## **ABSTRACT**

This paper aims to analyze the hydrogen and gas mixture as a fuel to the Otto cycle engine, considering it as an alternative fuel. It is necessary to study about alternative fuels because of global concern with environmental problems. These problems are mostly caused by fossil fuel which may be considered a short source of energy in the future. Thus, the study used some experiments to analyze an engine's work, in which it was used only gasoline, comparing it to the hydrogen engine, produced through electrolysis. The experiment data can be seen in comparative charts which showed a reduction in gasoline consumption and an increase in efficiency in cases that the hydrogen was used as an auxiliary fuel. The adoption of this technology faces obstacles like the high cost and level of danger, despite these problems have been solved as soon as the research about this issue has advanced. Understanding that the hydrogen is an abundant and a clean fuel with a great energy potential, it can be used as an energy source to vehicle engine as well as to other functions. It is for this reason that the hydrogen has been called "the fuel of the future".

**Keywords:** Hydrogen. Electrolysis. Otto Engine. Gasoline.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>9</b>
<b>MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....</b>	<b>9</b>
2.1 Introdução .....	9
2.2 Relação Ar/Combustível .....	10
2.3 Definições .....	11
2.3.1 Carburador.....	11
2.3.2 Octanagem .....	12
2.3.3 Taxa de Compressão.....	12
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>13</b>
<b>COMBUSTÍVEL .....</b>	<b>13</b>
3.1 Introdução .....	13
3.2 Gasolina.....	14
3.3 Hidrogênio.....	14
3.3.1 Eletrólise da Água.....	15
3.3.2 Histórico do Hidrogênio.....	16
3.3.3 O Hidrogênio nos Dias de Hoje.....	17
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>19</b>
<b>MATERIAL E MÉTODO .....</b>	<b>19</b>
4.1 Material .....	19
4.2 Método .....	21
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>24</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>24</b>
5.1 Análise do Consumo de Gasolina .....	24
5.2 Análise da Eficiência do Motor .....	25
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>29</b>
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>30</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>31</b>



## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

Durante a queima de combustíveis fósseis gases poluentes como o dióxido de carbono são liberados e lançados na atmosfera. Há um consenso no meio científico de que é necessária a redução da emissão de gases poluentes e um dos principais responsáveis pela poluição, principalmente nos grandes centros urbanos, são os automóveis. Estes liberam diferentes tipos de poluentes que são prejudiciais não só ao meio ambiente mas também à saúde humana.

Além da poluição, outra questão que traz preocupação é a crescente demanda por energia elétrica, que pode resultar em escassez das fontes energéticas fósseis (LEITZKE, 2014).

A partir daí surge a urgência em encontrar fontes de energia que sejam renováveis, limpas e economicamente viáveis, tanto pelo consumo do combustível fóssil ser prejudicial ao meio ambiente como também porque uma vez que esta é uma fonte não-renovável, suas reservas não podem ser regeneradas, existindo a possibilidade de esgotamento desta.

Nesse contexto, uma opção seria substituir os atuais combustíveis pelo hidrogênio, que resolveria a problemática de encontrar uma fonte que atenda à demanda necessária sem agredir o meio ambiente, uma vez que o hidrogênio é o elemento mais abundante no universo e sua combustão direta produz uma quantidade significativa de energia. “Um exemplo do potencial energético do hidrogênio está na fonte de energia do Sol – compõe 30% da massa solar” (Conelheiro, 2012).

Um dos métodos mais utilizados para a produção de hidrogênio é através da eletrólise da água, uma vez que o processo é econômico e relativamente simples, pois utiliza água como matéria prima (BARRETIRI, 2013). A produção é realizada através da passagem de corrente elétrica numa solução aquosa. Essa solução pode ser facilmente obtida através da adição do hidróxido de potássio (KOH) em água.

O presente trabalho tem por objetivo geral, analisar a viabilidade do uso de hidrogênio como substituto parcial da gasolina em motores de combustão interna de ciclo Otto. Inicialmente avaliou-se como combustível o uso apenas da gasolina, e em seguida, foi analisado o uso da mistura gasolina e hidrogênio.

Tem-se como objetivos específicos:

- ✓ Realizar testes para comparar os sistemas;
- ✓ Apresentar os resultados para discutir acerca do tema;
- ✓ Estimular o uso de uma tecnologia que pode ser vantajosa para a sustentabilidade energético ambiental e econômica.

## CAPÍTULO II

### MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

#### 2.1 Introdução

Um gerador de energia elétrica é, de forma resumida, um aparelho que converte energia mecânica em energia elétrica. “Tendo como princípio básico a indução eletromagnética, que por sua vez consiste no surgimento de uma corrente elétrica em virtude da variação do fluxo magnético nas proximidades de um condutor” (SENRA, 2014).

Motores são máquinas cujo objetivo é a obtenção de energia mecânica. Neste trabalho, o motor utilizado é de combustão interna, em que a energia mecânica é obtida através dos pistões, que se movimentam devido à essa combustão. O movimento alternativo do pistão é transformado em movimento rotativo através de um sistema biela-manivela (MARTINS, 2006).

Os motores de combustão interna podem ainda ser classificados como motores de ciclo Otto e motores de ciclo Diesel, cujo nomes estão associados aos seus respectivos desenvolvedores.

Nos motores ciclo Otto o combustível é misturado com o ar já no sistema de admissão. É também chamado de motores de ignição por centelha porque possuem uma vela de ignição que produz a faísca que inflama a mistura ar/combustível na câmara de combustão.

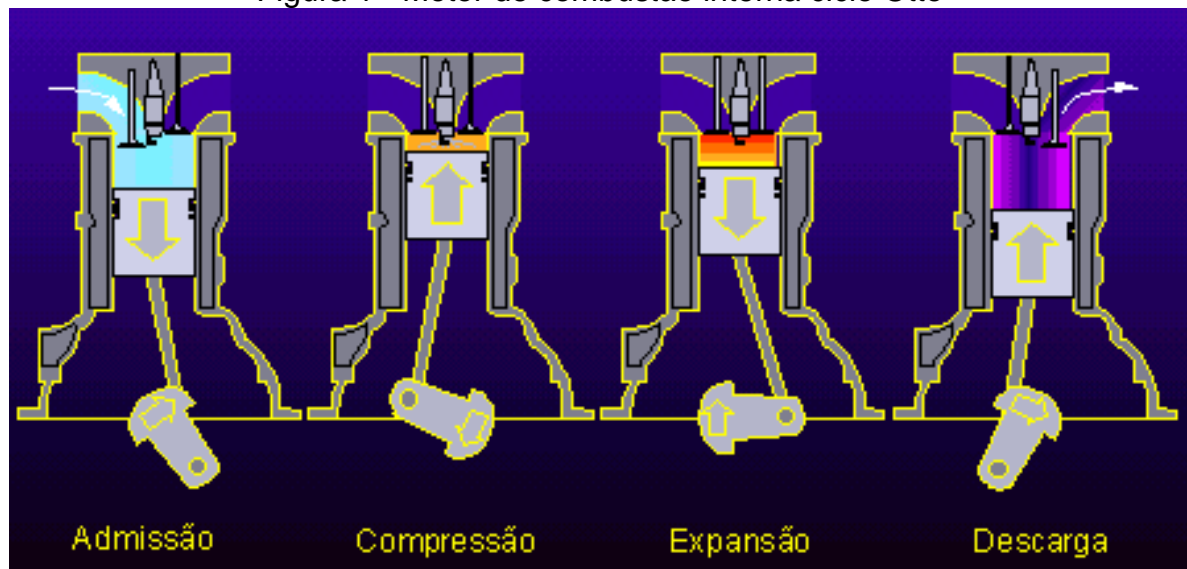
Nos motores ciclo Diesel a ignição ocorre por compressão, devido à alta temperatura que a mistura alcança por conta da elevada pressão atingida no final da compressão; por isso é também chamado de motores de ignição por compressão. O combustível é injetado na câmara contendo ar já a alta temperatura e pressão. (MARTINS, 2006)

O motor de combustão interna de quatro tempos é o mais utilizado nos automóveis hoje em dia, os quais possuem quatro etapas de funcionamento: admissão, compressão, combustão e exaustão. (MAGALHÃES, 2009)

No processo de admissão a válvula de admissão se abre, permitindo a entrada da mistura ar/combustível, enquanto o pistão se move de forma a aumentar o espaço no interior do cilindro. Na compressão, o pistão comprime a mistura, se

deslocando para o PMS (ponto morto superior). Na combustão, a mistura comprimida é inflamada, empurrando o pistão para o PMI (ponto morto inferior). No processo de exaustão, a válvula de exaustão se abre, eliminando os gases produzidos pela combustão, conforme Fig. 1.

Figura 1 - Motor de combustão interna ciclo Otto



FONTE: laves.com.br

## 2.2 Relação Ar/Combustível

A estequiometria da combustão combina proporções definidas de ar e combustível; teoricamente ela ocorre quando o oxigênio admitido é suficiente para oxidar totalmente o combustível. A potência, o torque e o rendimento dos motores baseados no ciclo Otto dependem, entre outros fatores, da proporção ar/combustível, sendo assim muito importante que seja utilizada uma relação mais próxima possível da estequiométrica.

Entretanto, nem sempre o termo “ideal” é propício para a relação estequiométrica, uma vez que para atender a diferentes situações, como por exemplo partida à frio ou desaceleração, o sistema deverá variar a quantidade de ar para mais ou para menos buscando atender às necessidades do motor.

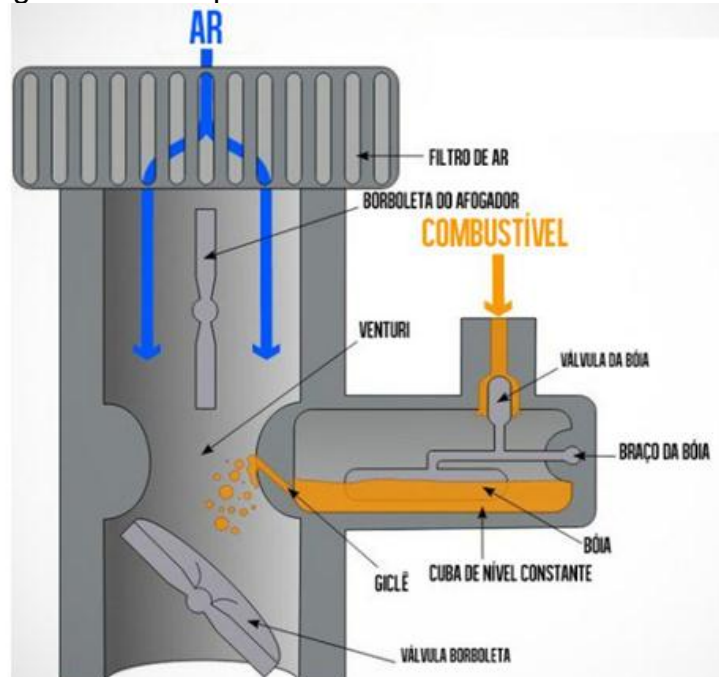
## 2.3 Definições

### 2.3.1 Carburador

Um dos componentes que controlam a mistura ar/combustível é o carburador. Pouquíssimo utilizado atualmente, o carburador é um componente mecânico cuja função é fornecer a proporção estequiométrica da mistura. Dosar a quantidade mais próxima possível da adequada é de suma importância pois sem isso a combustão se torna incompleta, acarretando diversos problemas, como o aumento do nível de emissão dos poluentes.

Seu princípio de funcionamento é simples: o ar entra no carburador e encontra uma restrição de área na seção central, chamado de efeito Venturi. O combustível é aspirado devido ao vácuo criado pelo efeito Venturi. (CONTESINI, 2014) A Fig. 2 exibe a seção transversal do carburador.

Figura 2 - Princípio de funcionamento do carburador



FONTE: <https://www.flatout.com.br>

A válvula borboleta, que é acionada pelo pedal do acelerador, é quem facilita um fluxo de ar mais rápido ou não através do carburador. A válvula do afogador serve para enriquecer a mistura para facilitar a partida, uma vez que a válvula do afogador fechada restringirá a entrada de ar.

### 2.3.2 Octanagem

Octanagem é o índice de resistência à detonação de combustíveis, ou seja, é a capacidade do combustível de resistir à autoinflamação antes do momento adequado. (MARTINELLI, 2008) Quanto maior a octanagem, maior a capacidade de ser comprimido em altas temperaturas na câmara de combustível sem que ocorra *Knocking* – detonação.

Segundo Saito (2016), a octanagem indica uma relação de equivalência à porcentagem de mistura em um isoctano, que por convenção tem octanagem 100, e o n-heptano, que tem octanagem zero. A Tab. 1 apresenta a octanagem de alguns combustíveis.

Tabela 1 - Octanagem de alguns combustíveis

Combustível	Octanagem
Gasolina	87
Etanol	98
Hidrogênio	130

FONTE: fem.unicamp.br apud SAITO (p.14)

### 2.3.3 Taxa de Compressão

A taxa de compressão é um parâmetro geométrico que indica quantas vezes a mistura ar/combustível aspirada para dentro do cilindro foi comprimida antes de iniciar a combustão.

É dada pela relação entre o volume que a mistura ar/combustível ocupa no cilindro quando o pistão está em seu ponto morto inferior (PMI) e quando está em seu ponto morto superior (PMS). Quanto maior a taxa de compressão, maior o aproveitamento energético do motor. (MARTINELLI JUNIOR, 2008)

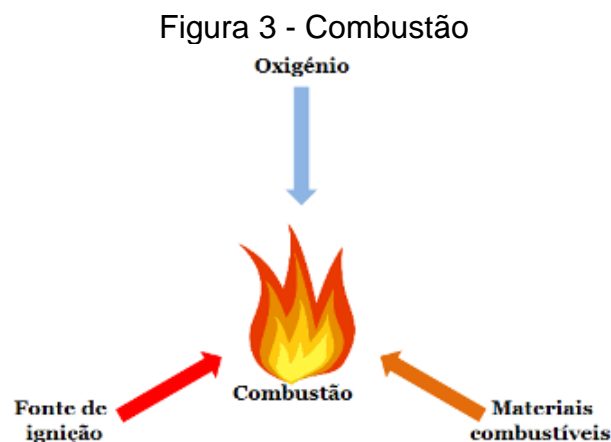
Uma das limitações na tentativa de aumento da taxa de compressão dos motores está na dificuldade que o combustível apresenta de resistir à autoignição (octanagem). O uso de um combustível que possua baixa octanagem em um motor que tenha alta taxa de compressão pode ser prejudicial ao motor devido ao grande número de *Knocking*, que causa perda de potência.

## CAPÍTULO III

### COMBUSTÍVEL

#### 3.1 Introdução

Os combustíveis são todas as substâncias que liberam calor ao reagir com o oxigênio. Tal fenômeno é denominado de combustão, como mostra a Fig. 3.



FONTE: ctborracha.com

A maior parte dos combustíveis fósseis são hidrocarbonetos, e por isso seus principais produtos são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). São exemplos deste tipo de combustível o petróleo, do qual deriva a gasolina, e o carvão mineral.

Muito tem-se falado sobre o dióxido de carbono ser o principal vilão do aquecimento global, devido a seu excesso na atmosfera. E uma vez que o combustível fóssil é uma fonte de energia não-renovável, ou seja, é uma fonte finita, tem crescido também uma preocupação à respeito de sua escassez.

E é a partir da preocupação ambiental adicionalmente à preocupação de que esse tipo de combustível se esgote que surge a necessidade de encontrar fontes alternativas de energia.

As fontes de energia que não emitem gases poluentes na atmosfera são chamadas de energia limpa, sendo o hidrogênio um exemplo dessas. Apesar dos combustíveis fósseis ainda serem os mais utilizados atualmente, os estudos à respeito dos combustíveis alternativos tem crescido cada vez mais no intuito de reduzir o consumo das fontes não-renováveis.

### 3.2 Gasolina

A gasolina utilizada nos veículos atuais apresentam variações que interferem no rendimento e eficiência do motor. As mais usuais são a gasolina comum, a aditivada e a *premium*. Neste trabalho, a gasolina utilizada foi a comum. Contesini (2017) diferencia:

A gasolina comum é a gasolina pura misturada a cerca de 27% de etanol em sua composição e sua octanagem é 87. É a mais poluente, uma vez que possui enxofre em sua composição.

O que diferencia a gasolina aditivada da gasolina comum é que ela possui agentes detergentes, dispersantes e lubrificantes em sua composição, que impedem o acúmulo de detritos e auxiliam na redução do desgaste das partes móveis em que a gasolina entra em contato.

Já a gasolina *premium*, ao contrário das outras duas, possui octanagem igual ou maior que 91 e 25% de etanol em sua composição, ao invés dos 27% das outras duas.

A gasolina possui impurezas contendo enxofre, que tem como produto da combustão o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), um gás bastante tóxico e corrosivo. A combustão incompleta da gasolina produz monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) ou fuligem ( $\text{C}$ ), que são extremamente tóxicos para o ser humano. Mesmo a sua combustão completa produz o indesejável  $\text{CO}_2$ .

### 3.3 Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento mais abundante do universo, constituindo 75% da massa de toda a matéria. (CONELHEIRO, 2012) Quando em seu estado natural, e sob condições ambientes de temperatura e pressão, o hidrogênio é, por definição, um gás incolor, inodoro e insípido.

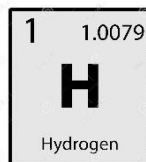
Embora seja altamente inflamável, o hidrogênio vem sendo aclamado como fonte energética por ser renovável, não tóxico e por possuir grande quantidade de energia por unidade de massa. Por isso a tendência é que seu consumo aumente com o avanço da tecnologia (VARGAS).

É o elemento mais simples e leve no que diz respeito a sua estrutura atômica, com apenas um próton e um elétron. Representado pela letra “H”, o hidrogênio é o



primeiro elemento na tabela periódica de Mendeleiev e não possui características comuns a de nenhuma família da tabela, apesar de estar localizado na família 1A, o que faz deste um elemento único (ver Fig. 4).

Figura 4- O hidrogênio na tabela periódica



FONTE: <https://pt.dreamstime.com/>

O hidrogênio é extremamente inflamável, pois necessita de pouca energia para a ignição, o que constitui um desafio para o seu armazenamento e transporte, que ainda deve ser feito em tanques de alta pressão. No caso de entrar em combustão, a alta velocidade de propagação, pode causar graves acidentes. Por isso é mais seguro consumir o hidrogênio diretamente, sem armazenamento.

Por ser um elemento quimicamente ativo, o hidrogênio só pode ser encontrado na Terra associado a outros elementos, daí não pode ser considerado como um recurso de energia primária, como o petróleo ou o gás natural, sendo necessário utilizar algum processo para sua obtenção. Para este trabalho o método de separação utilizado foi o de eletrólise da água.

O equipamento utilizado na produção de hidrogênio é chamado de célula de hidrogênio, ou célula de combustível, cujo objetivo é produzir o gás HHO – mistura de hidrogênio e oxigênio produzida pela separação das moléculas da água. Se mantiver a rotação de quando se utiliza apenas o combustível fóssil, ocorrerá uma redução no consumo do mesmo ao adicionar-se o gás HHO diretamente no sistema de carburação do motor. (BARI, 2009)

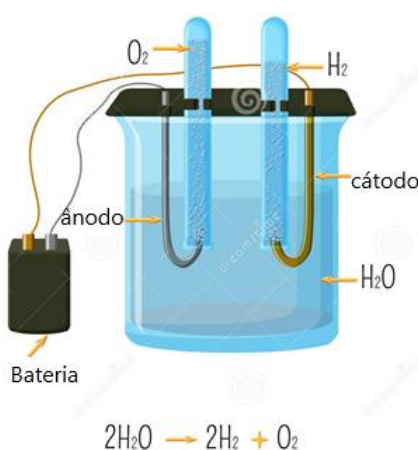
### 3.3.1 Eletrólise da Água

A eletrólise da água é um processo relativamente simples utilizado para obtenção do gás hidrogênio. Esse processo tem um princípio contrário ao da pilha, por exemplo: ao invés da reação química gerar eletricidade, a eletricidade irá causar uma reação química. É, portanto, um fenômeno físico-químico não espontâneo.

Para a realização da eletrólise, é necessário tornar a água condutora, uma vez que a água pura não conduz corrente elétrica. Com este fim, acrescenta-se à esta os eletrólitos – substância que dissolvida em água se torna condutora de corrente elétrica. Neste estudo foi utilizado como eletrólito o hidróxido de potássio (KOH).

A eletrólise vai ocorrer ao passar uma corrente contínua pela solução com eletrólitos. Medeiros (2015) explica: “a carga elétrica quebra a ligação química entre os átomos de hidrogênio e o de oxigênio e separa os componentes atômicos, criando partículas carregadas (íons). [...] O hidrogênio se concentra no cátodo e o ânodo atrai o oxigênio”. A Fig. 5 ilustra esse processo.

Figura 5 - Eletrólise da água



FONTE: dreamstime.com

Apesar de sua simplicidade, a obtenção de hidrogênio a partir da eletrólise corresponde a apenas 4% da produção mundial. Isso se deve ao fato de que em países desenvolvidos a eletricidade tem um alto custo, sendo mais barato obter o hidrogênio a partir de outros combustíveis fósseis.

### 3.3.2 Histórico do Hidrogênio

Segundo Wollmann (2013), o primeiro caso registrado a respeito do hidrogênio foi por volta do ano 1500, quando o alquimista suíço Paracelsus dissolveu ferro em ácidos e observou a liberação de um “ar explosivo”. Mais tarde, o químico Robert Boyle também obteve hidrogênio pelo mesmo método.

Mas foi Henry Cavendish que percebeu, em 1766, que o hidrogênio era uma nova substância. Seu nome foi atribuído por Lavoisier, em 1785, e deriva do grego *hidro* (água) e *genes* (gerador).

O primeiro cientista conhecido por prever plenamente o potencial energético do hidrogênio foi Haldane (1892-1964). A cerca de um século atrás ele ministrava palestras onde afirmava que o hidrogênio seria o combustível do futuro e escrevia sobre como ele seria produzido, armazenado e aplicado. (WOLLMANN, 2013)

A história das células a combustível teve impulso no meio do século passado quando foram utilizadas em naves que foram para o espaço devido ao hidrogênio ser extremamente leve, o que é imprescindível nesses casos.

### 3.3.3 O Hidrogênio nos Dias de Hoje

O hidrogênio surge hoje em dia como uma nova forma de suprimento de energia limpa para os veículos (ARAÚJO, 2008).

O atual diretor-presidente da Ford Motors Company, expressa sua confiança nas células de combustível:

Creio que os veículos com células de combustível terminarão com os 100 anos de reinado dos motores de combustão interna como a fonte de potência dominante para o transporte pessoal. Será uma situação de ganhar por todos os lados – os consumidores obterão uma fonte de potência eficiente, as comunidades terão emissões zero e os fabricantes de automóveis terão outra grande oportunidade de negócio – uma oportunidade de crescimento (WILLIAM C. FORD JR apud GOLDENSTEIN e AZEVEDO, p.248).

E ele não é o único a pensar assim – uma pesquisa da consultora KPMG feita com mil executivos do setor automobilístico de 42 países revelou que 78% acreditam que essa é a melhor alternativa para os veículos do futuro.

Mas para isso, é necessário ainda que haja um domínio maior quanto a esta tecnologia e uma redução de seus custos. A partir do momento em que a célula de hidrogênio se tornar viável é que ela poderá ser utilizada não só em veículos, mas em uma infinidade de outras aplicações.

Atualmente estão sendo gastos bilhões de dólares pela indústria automobilística visando a sua utilização. Diversas montadoras, inclusive já apresentaram protótipos de veículos que utilizam as células de combustível. Pesquisas estimam que essa tecnologia estará sendo utilizada comercialmente em

torno de 5 a 40 anos. No Greater Los Angeles Auto Show, em 2006, houve um aumento significativo de carros pequenos movidos a hidrogênio (CRAWLEY apud ARAÚJO, 2008).

A respeito da eficiência energética, pesquisas apontam que um motor movido a células de hidrogênio converte em torno de 55% da energia do combustível em energia mecânica, ao passo que nos motores à gasolina apenas 30% dessa energia é aproveitada.

## CAPÍTULO IV

### MATERIAL E MÉTODO

#### 4.1 Material

Os testes foram realizados no Laboratório de Inovação do Centro de Tecnologia da UFPB. Para tal, foi utilizado um motogerador a combustão interna, ciclo Otto e uma célula geradora de hidrogênio. Uma vez que todo o hidrogênio produzido será imediatamente consumido pelo motor, o procedimento é seguro, com baixo risco de explosão.

Para este objeto de estudo, o eletrólito utilizado foi o hidróxido de potássio (KOH), também conhecido como potassa cáustica, que adicionado à água destilada dará origem ao gás HHO após o processo de eletrólise.

O motogerador utilizado foi o Schulz S2500 MG, que é um motor à gasolina 4 tempos, de potência nominal 2 KW e tensão nominal 110/220 V (ver Fig. 6).

Figura 6 - Motogerador Schulz S2500 MG



FONTE: Autor (2018)

O kit gerador de hidrogênio utilizado é composto de um reservatório de água, que armazena a solução eletrolítica, de um filtro, que tem a função de impedir a

entrada de líquido no motor, e da célula de hidrogênio, que é o componente de maior importância. A célula possui um formato que permite manter a corrente elétrica entre as placas, conforme Fig. 7.

Figura 7 - Kit gerador de hidrogênio



FONTE: CARVALHO FILHO (2017)

Na solução eletrolítica a proporção do eletrólito utilizada foi de 10g para 1L de água. Uma vez que também é necessário controlar o fornecimento do gás HHO, foi utilizado um amperímetro para medir a intensidade do fluxo da corrente elétrica. Um fornecimento de energia admissível requeria no mínimo 10A. Neste experimento, para diferentes cargas a corrente fornecida pela bateria esteve entre 15 e 18A.

Para a medição do consumo de combustível, foi utilizada uma balança com precisão de 2g, que foi colocada em uma superfície plana. O tanque de combustível tinha de ficar sobre a mesma por 5 minutos; daí então observava-se no medidor o quanto que havia sido consumido nesse intervalo de tempo.

Para medir a potência de cada lâmpada e acompanhar a frequência em cada teste foi utilizado um analisador de energia (ver Fig. 8). Por este, foi possível acompanhar se após os primeiros cinco minutos em que uma lâmpada era acionada o sistema estava realmente estabilizado. O banco de lâmpadas utilizado é apresentado na Fig. 9.

Figura 8 - Analisador de energia



FONTE: CARVALHO FILHO (2017)

Figura 9 - Banco de Lâmpadas



FONTE: Autor (2018)

## 4.2 Método

A seguir será descrito o sistema e relatado as modificações que foram necessárias para realizar os testes. Depois serão apresentados os resultados dos testes e a análise da eficiência de um motor que utiliza o hidrogênio combinado à

gasolina quando comparado à um motor que utiliza somente a gasolina como combustível.

No primeiro experimento apenas a gasolina foi utilizada como combustível e as condições originais de fábrica foram mantidas. A cada vez que uma lâmpada era acionada, esperava-se cinco minutos para sua estabilização, uma vez que é necessário esperar que o motor atinja uma determinada faixa de temperatura para que ele funcione de forma adequada. Em seguida, media-se, utilizando a balança da Fig. 10, o quanto havia sido consumido em outros cinco minutos.

Figura 10 - Balança



FONTE: Autor (2018)

O segundo experimento tinha como objetivo utilizar o hidrogênio junto com a gasolina como combustível. Para isso foi necessário utilizar o kit gerador de hidrogênio mencionado anteriormente.

O reservatório da solução, ou borbulhador, deveria ficar acima da célula, para que a solução eletrolítica descesse até o gerador por meio da gravidade. Daí a solução sofreu o processo de eletrólise e subiu novamente para o reservatório em forma de gás  $H_2$  e  $O_2$  juntamente com os eletrólitos. Lá, o gás foi direcionado ao filtro e em seguida a sucção do motor foi a responsável pela circulação do gás no sistema. Para que o gás HHO fosse admitido pelo motor, foi utilizado um difusor para servir de entrada auxiliar entre o filtro de ar e o carburador.

Daí então repetiu-se o que foi feito no primeiro experimento, também esperando cinco minutos para estabilização das lâmpadas, e mais cinco para a realização dos testes. Na Fig. 11 está representado o esquema do segundo experimento. Para alimentar a célula de hidrogênio, uma bateria foi utilizada.



Figura 11 - Esquema do experimento em que foi utilizado o hidrogênio



FONTE: bisalarmes.com

Manter a mesma rotação nos dois sistemas foi essencial para identificar a real economia de combustível alcançada com o uso do hidrogênio.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1 Análise do Consumo de Gasolina

Nos primeiros testes, os quais apenas a gasolina foi utilizada como combustível, o consumo, em gramas por minuto, obtido foi:

Tabela 2 - Carga *versus* consumo de gasolina tendo esta como único combustível

<b>Carga (KW)</b>	0,29	0,57	0,85	1,13	1,4	1,68	1,87
<b>Consumo (g/min)</b>	8,8	11,2	12	16,4	24,8	26,4	30

FONTE: Autor (2018)

Os seguintes experimentos foram feitos utilizando o hidrogênio e a gasolina como combustível. Uma vez que os valores de corrente elétrica influenciam diretamente na produção de hidrogênio, estes também foram coletados para análise. Para estes testes, foram utilizadas as adaptações mencionadas na metodologia. Os resultados obtidos foram:

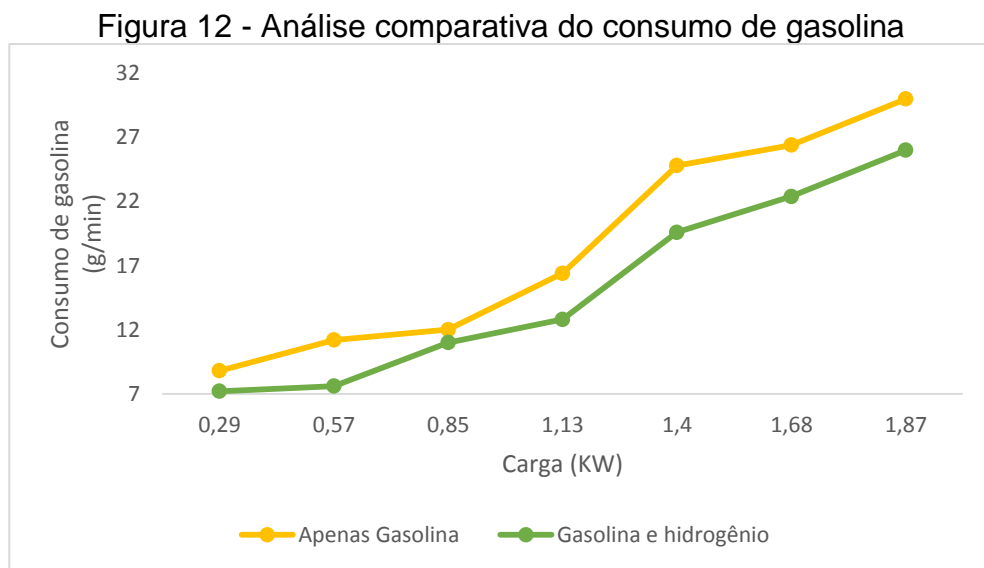
Tabela 3 - Carga aplicada ao gerador *versus* consumo de gasolina e potência consumida para geração do hidrogênio como combustível

<b>Carga (KW)</b>	0,29	0,57	0,85	1,13	1,4	1,68	1,87
<b>Consumo de Gasolina (g/min)</b>	7,2	7,6	11,2	12,8	19,6	22,4	26
<b>Potência para geração de Hidrogênio (W)</b>	177	212,4	188,8	188,8	212,4	190,4	204

FONTE: Autor (2018)

Comparando as Tab. 2 e Tab. 3, é possível identificar a queda no consumo após a aplicação do gás HHO na mistura. Os dados aí apresentados são resultados médios, realizados para cada situação mencionada.

A Fig. 12 apresenta o consumo de gasolina do motor trabalhando apenas com gasolina comparado ao consumo de gasolina de quando foi utilizada a mistura de hidrogênio e gasolina como combustível, mostrando que o segundo sistema demonstrou ser mais compensatório.



FONTE: Autor (2018)

Ocorreu, em média uma redução de 18% no consumo da gasolina quando foi utilizado o motor na forma dual em relação à quando foi utilizado o motor em sua configuração original.

## 5.2 Análise da Eficiência do Motor

Mensurou-se também a eficiência dos dois sistemas. Segundo Wylen (2003), para o motor que utiliza apenas a gasolina temos como indicado na Eq. 1 e 2:

$$Ef_{100\% \text{ gas}} = \frac{Pot_{gerada} [W]}{Pot_{gas} [W]} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$$Pot_{gas} = PCI [J/g] * Cons_{gas} [g/s] \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

$Ef_{100\% \text{ gas}}$  é a eficiência do motor que usa apenas gasolina como combustível

$Pot_{gerada} [W]$  é a potência gerada

$Pot_{gas} [W]$  é a potência de entrada da gasolina

Daí, então, para a gasolina, têm-se:

Tabela 4 - Eficiência do motor à gasolina

Carga (W)	Eficiência
290	4,6%
570	7,0%
850	9,8%
1130	9,5%
1400	7,8%
1680	8,8%
1870	8,6%

FONTE: Autor (2018)

Ainda de acordo com Wylen (2003), temos a Eq. 3 e 4:

$$Ef_{gas+hid} = \frac{Pot_{gerada} [W]}{Pot_{gas} [W] + Pot_{hid} [W]} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,

$$Pot_{hid} [W] = Tensão_{eletrólise} [V] * Corrente_{eletrólise} [A] \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

$Ef_{gas+hid}$  é a eficiência do motor que utiliza a mistura gasolina e hidrogênio

$Pot_{hid}$  é a potência usada para produzir o hidrogênio

Os valores obtidos de tensão e corrente elétrica do processo de hidrólise durante os testes estão listados na Tab. 3. Utilizando a equação da eficiência do motor para a mistura gasolina mais hidrogênio, tem-se:

Tabela 5 - Eficiência do motor à gasolina e hidrogênio

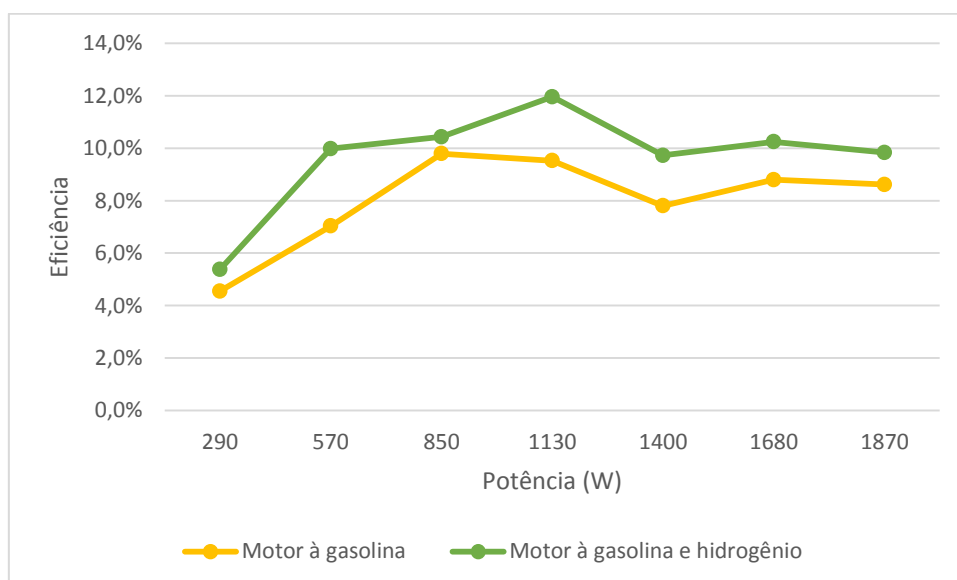
Carga (W)	Eficiência
290	5,4%
570	10,0%
850	10,4%
1130	12,0%
1400	9,7%
1680	10,2%
1870	9,8%

FONTE: Autor (2018)

Os resultados das duas tabelas de eficiência foram plotados em um só gráfico para melhor visualização da diferença entre os dois sistemas, conforme ilustra a Fig. 11.

Esta figura mostra que quando o hidrogênio é adicionado o motor se torna mais eficiente. O  $H_2$  e o O atuam como um estimulante para inflamar a gasolina de forma mais completa: o teor superior de oxigênio da mistura permite que mais gasolina queime.

Figura 13 - Análise comparativa da eficiência do motor



FONTE: Autor (2018)

Em suma, verificou-se, que o uso de hidrogênio melhora a eficiência do motor e reduz o consumo de combustível fóssil. E como o hidrogênio é considerado uma

fonte de energia abundante e relativamente fácil de ser obtida, o seu uso se torna bastante promissor.

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSÃO**

Este trabalho analisou a eficiência de um grupo gerador com motor ciclo Otto, comparando o seu funcionamento na forma dual em relação à sua configuração original.

É importante observar que para a realização dos testes foram feitas adaptações em um motor que foi desenvolvido para funcionar à gasolina. Sendo assim, pode-se deduzir que resultados ainda mais satisfatórios poderiam ser obtidos em um motor que já fosse desenvolvido para tal fim.

Seria necessário o desenvolvimento de novos projetos para a câmara de combustão e uma vez que o hidrogênio possui octanagem alta, ele poderia ser usado em um motor com uma taxa de compressão maior, por exemplo.

Ainda assim os experimentos mostraram que houve uma melhora na eficiência do motor e uma redução no consumo de gasolina, o que já torna o uso do hidrogênio favorável.

Outro projeto poderia ser desenvolvido utilizando uma célula de hidrogênio mais eficiente e com maior capacidade de produção de HHO para alimentar o motor, para assim analisar qual a eficiência do motor tendo uma quantidade ainda mais reduzida de gasolina como combustível.

Estima-se que o desenvolvimento de novas tecnologias e o aumento no preço dos combustíveis fósseis barateiem os custos e tornem essa tecnologia mais viável aos poucos.

### **SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Com objetivo de verificar o aumento da eficiência observada neste trabalho, sugere-se o uso do kit de geração de hidrogênio em um veículo que se tenha conhecimento do consumo real funcionando com o combustível original.



## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, P. D. **O uso energético do hidrogênio produzido por fontes renováveis para a aplicação veicular no contexto do mecanismo de desenvolvimento limpo:** estudo de caso na cidade de São Paulo. 2008. 226 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

BARRETIRI, T. R.; HAUS, T. L. **Análise da viabilidade da utilização de hidrogênio em motores a combustão interna.** 2013. 19 f. Programa de Apoio à Iniciação Científica, Fundação Auracária, Curitiba, 2013.

BARI, S.; ESMAEIL, M. M. **Effect of H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine** *Fuel*, Amsterdam, v. 89, n. 2, p. 378-383, 2010.

CARVALHO FILHO, L. H. de. **Determinação da eficiência e análise dos gases de escape de um motor ciclo Otto alimentado de forma dual com gasolina e hidrogênio.** 2017. 51 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

CONELHEIRO, L. T. P. **Desenvolvimento de um sistema gerador de hidrogênio gasoso para utilização como combustível alternativo em veículos automotores.** 2012. 9 f. Trabalho de iniciação científica (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – Centro Universitário de Maringá, Maringá, 2012.

CONTESINI, L. **Como funciona um carburador?** 21 fev. 2014. Disponível em <<https://www.flatout.com.br/como-funciona-um-carburador/>> Acesso em 22 fev. 2018.

\_\_\_\_\_. **Quais as diferenças entre gasolina comum, aditivada, premium e de alta octanagem?** 4 out. 2017. Disponível em <<https://www.flatout.com.br/quais-as-diferencas-entre-gasolina-comum-aditivada-premium-e-de-alta-octanagem/>> Acesso em: 28 jan. 2018.

GOLDENSTEIN, M.; AZEVEDO, R. L. S. **Combustíveis alternativos e inovações no setor automotivo:** será o fim da “era do petróleo”? BNDS, 2008.

LEITZKE, F. B.; ZOBOLI, G. A. **A energia e o desafio do aumento de demanda.** 2014. Trabalho realizado como requisito parcial para a aprovação na disciplina Geografia.

MAGALHÃES, F. et al. **Motores de combustão interna**. 2009. 24 f. Relatório – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

MARTINELLI JUNIOR, L. C. M. **Motores a combustão interna**: conceitos básicos. Iljuí, RS: Unijuí, *Campus Pamabi*, 2008.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2006.

MEDEIROS, W. B. **Métodos e eletrólitos utilizados na produção de hidrogênio**. 2015. 6 f. Relatório para o Programa Institucional de Iniciação Científica, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Itaipu, 2015.

SAITO, G. C. D. **O uso do hidrogênio como aditivo a combustíveis em motores de combustão interna**. 63 f. Relatório final da Iniciação Científica, Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, Sorocaba, [2016].

SENRA, F. O.; LIMA, K. A. M.; ABREU, R. A. **Estudo da aplicação de hidrogênio e gasolina em motor ciclo Otto**. 2014. 41 f. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica – Automação e Sistemas) – Universidade São Francisco, Itatiba, 2014.

VARGAS, R. A. et al. **Hidrogênio**: o vetor energético do futuro? São Paulo: Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

WOLLMANN, F. L. **Estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores**. 2013. 73 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013.

WYLEN, Van.; J.G.,SONNTAG, R.E., BORGNAKKE, C. – **Fundamentos da Termodinâmica**. 6 Ed. Edgard Blücher, 2003.